

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407744

基于超声波的高强螺栓轴力检测技术研究*

徐晓¹ 姜涛² 靳超¹ 高杰³ 吕炎³ 何存富³

(1. 中国船级社实业有限公司 北京 100124; 2. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124;

3. 北京工业大学信息科学技术学院 北京 100124)

摘要: 高强螺栓作为关键零部件,广泛应用于悬索桥、风电塔筒等重要结构中,其安装质量对整体结构的稳定性和安全性具有至关重要的影响。然而,传统的扭矩法难以准确测量螺栓的轴向预紧力,从而难以有效评估结构的稳定性。为解决这一问题,基于声弹性效应,设计了高压激励和压控增益等电路,研制了一套螺栓轴力检测系统。系统通过激励压电传感器接收回波信号,并采用互相关算法计算渡越时间差以表征螺栓的应力状态,最后对风电螺栓进行了应力-渡越时间标定实验及超声波与扭矩法的对比实验。实验结果表明,当螺栓轴向预紧力达到其额定值的40%时,该系统的应力测量误差率 $\leq 2.81\%$,且分辨率可达0.2507 kN,能够有效满足螺栓轴向预紧力的测量要求。与传统扭矩法相比,超声波在螺栓服役状态下的应力测量误差控制与分辨率均具有显著优势,为工业领域关键部件的应力测量提供了可靠的技术方案。

关键词: 高强螺栓;声弹性效应;应力状态;互相关算法;轴力检测;超声波;扭矩法

中图分类号: TN7; TH871 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on ultrasonic-based axial force detection technology for high-strength bolts

Xu Xiao¹ Jiang Tao² Jin Chao¹ Gao Jie³ Lyu Yan³ He Cunfu³

(1. China Classification Society Industrial Co., Ltd., Beijing 100124, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: High-tensile bolts are critical components in key structures such as suspension bridges and wind turbine towers, where the quality of their installation significantly impacts the stability and safety of the entire structure. However, traditional torque methods struggle to accurately measure the axial preload of bolts, making it difficult to assess structural stability effectively. To address this issue, a bolt axial force detection system was developed based on the Acoustoelastic effect, incorporating circuits such as high-voltage excitation and voltage-controlled gain. The system detects echo signals through an excitation piezoelectric sensor and utilizes a cross-correlation algorithm to calculate the time-of-flight difference, which reflects the stress state of the bolt. Stress-transition time calibration experiments were conducted, along with comparative testing between the ultrasonic and torque methods for wind power bolts. The experimental results indicate that when the axial preload of a bolt reaches 40% of its rated value, the system achieves a stress measurement error rate of $\leq 2.81\%$, with a resolution of up to 0.2507 kN. This meets the requirements for accurate axial preload measurement. Compared with the traditional torque method, the ultrasonic approach demonstrates a clear advantage in reducing measurement error and improving resolution during bolt service, offering a reliable technical solution for stress measurement in industrial applications.

Keywords: high-strength bolts; acoustoelastic effect; stress state; cross-correlation algorithm; axial force detection; ultrasonic method; torque method

0 引言

螺栓是一种常用的联接件,它被广泛的应用在机械设备、航天、工程建设、交通工具、仪器仪表等领域^[1]。常见的无损检测常规方法主要包括扭矩扳手法、电阻应变片法、磁弹法检测、X 射线法、超声波法等^[1-3]。目前工业现场多采用扭矩扳手进行螺栓安装^[4-5],并由扭矩推算出螺栓的轴向应力,由于螺帽与螺纹之间存在摩擦,使螺栓产生轴向应力的扭矩不到扭力扳手数值的 20%^[6]。因此,准确测量螺栓的轴向应力大小,进而判断螺栓安装状态具有非常重要的现实意义^[7]。相较于其他无损检测方法,超声波检测技术具有测量范围广、检测灵敏度高等优点,成为工程领域广泛应用的无损检测技术之一^[8]。

超声检测技术始于 20 世纪中期,并迅速发展为一种广泛应用的检测手段。与扭矩法相比,超声检测具有无损检测、高度集成化、精度高等显著优点,广泛应用于工程领域的材料检测、结构健康监测和缺陷检测等方面。随着工程应用中对超声检测需求的日益增长,超声波表征应力的相关技术得到迅速发展。其中,螺栓轴向应力检测作为超声波表征应力技术的一个重要应用场景,已成为多个领域亟待解决的重要科学问题,并展现出广阔的应用前景。

国外超声波应力检测技术的发展已经有了很长的历史。自从发现了声弹性现象,声波传播速度和应力存在着相互的关联,随着该理论的提出,许多研究都致力于通过超声波测量应力。二十世纪九十年代,国内超声螺栓应力检测技术快速发展,徐春广等^[9]依据声弹性理论,采用体波相结合法,对栓体长度未知的紧固螺栓轴向应力进行测量,测量误差小于 2.936 7%,大幅提高了体波相结合法的精度。Hosoya 等^[10]通过实验和模态分析确定了螺栓连接节点的夹紧力,其中高频区螺栓头局部模态频率的变化被解释为夹紧力的变化。监测自动 FRF,研究了螺栓连接动态特性随夹紧力的变化。Pan 等^[11]分析描述了螺栓应力和变形状态的常规测试方法,基于形状因子,采用纵波和横波的组合来建立一个数学模型,用于测量装配过程中施加在螺栓上的预紧力,无需测量环境温度。2022 年,严勇等^[12]根据超声导波法测量螺栓轴向应力的基本原理,建立了简便有效的声速标定测试实验系统,通过实验分析了测试系统延时误差和温度误差对不同测试方法测量精度的影响。唐心亮等^[13]针对螺栓零件检测的难点,提出了一种基于多尺度多方向螺栓的检测算法,提出的模型可以解决螺栓零件在识别任务中因拍摄角度和复杂环境出现的问题。吴向阳等^[14]根据声弹性原理和胡克定律推导了纵波法和横纵波法的螺栓

轴向应力测量公式与温度变化的敏感性差异。Zhang 等^[15]采用射频磁控溅射技术制备氧化锌(ZnO)压电薄膜材料,并研究了制备过程中溅射功率和靶基板距离对氧化锌压电薄膜结构和超声特性的影响,为实现氧化锌压电薄膜在螺栓预紧力测量领域的应用奠定基础。何星亮等^[16-18]搭建超声应力测量平台,讨论了脉冲超声激励下的实测导波信号特点并提出使用经验小波算法对信号进行模态分解,有效获取了信号中特定模态的群速度,其测量方法平均误差约为 4%,精度明显高于传统方法。

超声波声弹性效应测量螺栓轴向应力精度很高,现在常采用超声轴向应力测量方法可分为纵波法和体波结合法。纵波法必须首先测量无应力螺栓的超声波渡越时间(time of flight, TOF),只适合于控制装配中的预紧力。体波结合法^[19-20]不需要对正在服役的螺栓进行拆卸测量,在实际工程中有更好的可操作性,同时适用于长期监测。

为解决传统扭矩法测量螺栓轴力误差大的问题,基于声弹性效应,设计一套包含高压激励和压控增益电路等电路的螺栓轴力检测系统。系统通过压电传感器接收回波信号,并运用互相关算法计算 TOF,以表征螺栓的轴向应力。实验采用 M42、M45 和 M64 风电螺栓,分别进行拉伸标定和扭矩系数标定,通过测量 TOF,建立螺栓轴向应力模型。在此基础上,对系统误差进行评估,分析实际测量精度。最后,将超声法的测量结果与扭矩法进行对比。系统创新性地结合了声弹性效应和互相关算法,通过超声波测量螺栓轴力,突破了传统扭矩法的局限性,在大尺寸螺栓检测中具有广泛的工程应用前景。

1 螺栓应力表征方法

在不同应力状态下,超声波在螺栓中传播的 TOF 会发生变化,利用 TOF 得到螺杆所受的轴向应力,该方法主要运用了胡克定律和声弹性效应两个理论。根据声弹性原理,螺栓中超声波沿轴向传导的速度与该方向应力呈线性关系(假定螺栓承受轴向均匀拉伸应力),此时有:

$$V_{\sigma} = V_0(1 + K\sigma) \quad (1)$$

其中, V_{σ} 为应力作用下的声速; V_0 为超声纵波无应力状态下的传导速度; K 为声弹性系数; σ 为螺栓轴向应力。

当轴向应力 $\sigma=0$,总长为 L_0 的螺栓纵波 TOF 为:

$$T_0 = 2 \frac{L_0}{V_0} \quad (2)$$

螺栓承受的轴向应力为 σ 时,螺栓纵波 TOF 为:

$$T_1 = \frac{L_1 + \Delta L}{V_{\sigma}} + \frac{L_2}{V_0} \quad (3)$$

其中, L_1 为螺栓有效受力长度; L_2 为螺栓不受力长度; ΔL 为螺栓有效受力长度因轴向应力引起的长度变化。

将式(1)、(2)代入式(3), 并依据胡克定律计算螺栓应力为:

$$\sigma = \frac{E \cdot K_S V_0}{2L_1} (T_1 - T_0) \quad (4)$$

其中, E 为螺栓材料的弹性模量; T_0 为测量零应力 TOF; T_1 为测量应力为 σ 时的 TOF; K_S 为应力系数, 机械伸长量和声程增加量的比值, 将式(4)化简得:

$$\sigma = \frac{E \cdot K_S V_0}{2L_1} T_1 - \frac{E \cdot K_S V_0 T_0}{2L_1} \quad (5)$$

令 $K = \frac{E \cdot K_S V_0}{2L_1}$, $b = -\frac{E \cdot K_S V_0 T_0}{2L_1}$, 由此可得螺栓应力

表征函数为:

$$\sigma = KT_1 + b \quad (6)$$

其中, K 、 b 可通过标定试验获取。

2 系统设计与实验方法

2.1 螺栓轴力检测系统研制

为了实现螺栓预紧力的精确测量, 需研制一套螺栓轴力检测系统, 包括激励超声信号、程控增益放大回波信号、高速采集信号、上位机读取 TOF 信号。基于上述功能, 设计研制了激励接收模块、高速采集模块、电源模块和上位机面板, 电路模块如图 1 所示。该系统旨在实现高精度、高效率的超声应力测量, 进而通过螺栓的应力状态来间接推算出其预紧力, 确保测量的准确性。



图 1 螺栓轴力检测系统

Fig. 1 Bolt axial force testing system

1) 电源供电电路

电源板卡通过隔离电源模块进行多电压升压、降压输出控制, 输入电压为 24 V, 主输出电压为 $V_G = \pm 100$ V、 $V_{DD} = 12$ V、 $V_{AD} = \pm 5$ V, 相关电路原理如图 2 所示。

整体供电电路采用 URA 系列隔离模块, 高压 $V_G = \pm 100$ V 输出采用 URA24100 隔离模块, 用于高压激励电路产生高压双极性; 低压 $V_{DD} = 12$ V 输出采用 URA2412 隔离模块, 主要用于高压激励电路的脉冲驱动电压; 低压

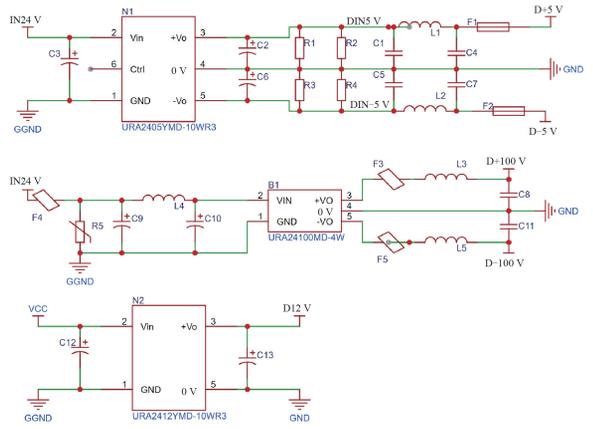


图 2 电源电路

Fig. 2 Power supply circuit

$V_{AD} \pm 5$ V 输出采用 URA2405 隔离模块, 用于增益放大电路中运算放大器的供电。

2) 高压激励电路

激励接收模块采用双极性脉冲信号激励压电传感器, 主控芯片 FPGA 输出高低电平通过 MOS 管驱动器输出后, 经场效应管输出两路驱动信号通道 A、B; 场效应管按驱动信号时序依次导通, 输出高压双极性方波脉冲, 其激励电路如图 3 所示。

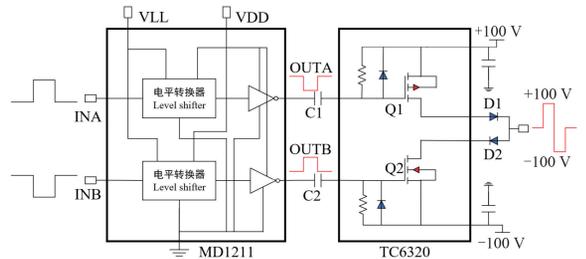


图 3 双极性方波激励

Fig. 3 Bipolar square wave excitation

场效应管驱动器选用 MD1211, 该器件具有两个驱动通道, 能提供 12 V/2 A 的驱动能力, 驱动信号的边沿时间为 10 ns, 能够满足激励频率的要求。场效应 Q1 和 Q2 管选用 TC6320, 该器件集成了一对 N/P 沟道增强型场效应管, 耐压 200 V, 所以 TC6320 的供电电压为 ± 100 V。两个场效应管的导通时的最大上升沿和下降沿时间均为 20 ns, 且参数具有较高的一致性, 所以理论上可以激发出幅值为 ± 100 V, 最大中心频率为 25 MHz 的双极性高压脉冲信号。

双极性脉冲激励电路的工作原理如下: 初始状态时 ($V_{DD} = 12$ V), OUTA 通道输出高电平 $V_{OA} = 12$ V, 电容 C1 充电, 此时电容两端电压 $V_{C1} = 88$ V, Q1 的栅极对地电压 $V_{G1} = 100$ V。OUTA 通道的输出变为低电平时, 即

$V_{OA} = 0 \text{ V}$ 时,由于电容的储能特性,两端电压保持不变,则 Q1 栅极对地电压下降为 88 V,此时栅源电压 $V_{GS1} = -12 \text{ V}$,满足 P 沟道 MOSFET 的导通条件,Q1 漏源之间导通,漏极电压 $V_{D1} = 100 \text{ V}$ 。驱动器通道 OUTA 产生一个持续时间为 $T/2$ 的低电平脉冲信号,则在输出端产生时间为 $T/2$,幅值为 +100 V 的正极性脉冲。同理,初始时,通道 OUTB 输出为低电平,当其输出由低变高时,由于电容 C2 的作用,N 沟道 MOSFET 的 $V_{GS2} = 12 \text{ V}$,使 Q2 导通并产生幅值为 -100 V 的脉冲信号。当 OUTA 和 OUTB 两个通道交替产生驱动脉冲信号时,就可以输出幅值为 $\pm 100 \text{ V}$,周期为 T 的双极性脉冲信号。连续提供多周期的驱动信号,则在输出端能够产生多周期的脉冲激励信号。此外,在换能器与 MOS 管之间串联了二极管 D1 和 D2,用以隔离噪声。

3) 压控增益放大电路

双极性脉冲信号激励压电传感器产生超声波信号经反射后回波信号进入信号接收电路,而接收到的反射回波信号往往只有数毫伏至数百毫伏的电压信号,需要经过放大,才能顺利地高速采集模块采集,为此设计构成压控增益放大电路,满足 ADC 的输入同时防止信号畸变,保证数据采集成功。

压控增益放大电路设计如图 4 所示,采取多级放大控制,选用电压反馈运算放大器 AD8021 作为电压跟随器。二级程控增益放大选用低噪声、电压控制型芯片 AD603,带宽为 90 MHz,增益可调范围为 -10~30 dB。由 D/A 转换器 TLC5615 提供控制电压,实现了放大电路增益的程控。当其输出在 0.5~1.5 V 之间变化时,可以控制单级增益在 -10~30 dB 之间变化,两级放大电路采用相同的控制电压,则系统的总程控增益调节范围在 -20~60 dB 之间。

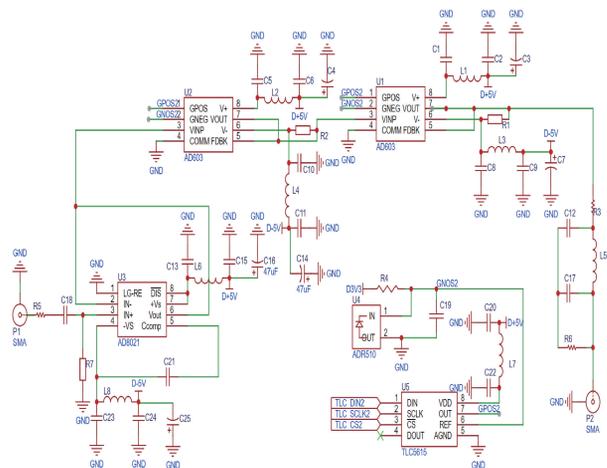


图 4 增益放大电路
Fig. 4 Gain amplification circuit

4) 高速采集模块

为了实现对螺栓应力-TOF 信号的高精度测量,高速采集模块采用了高采样率 (3 GS/s) 的数据采集卡 USS9802,从而能够对信号进行高速采集。数据的读取与缓存方面采用多线程处理模式,将数据采集和数据处理分为两个独立线程:

(1) 数据采集线程:FPGA 主控通过外触发模式控制 USS9802 采集卡获取数据,并将数据写入缓冲区。

(2) 数据处理线程:从缓冲区读取数据,进行带通滤波,并将处理后的数据发送。

如图 5 所示,为了防止激励的高压信号损坏采集卡,确保传输至采集卡的信号具有良好的信噪比,将高压脉冲与放大电路进行隔离,设置了限幅二极管 PMBD7000,利用二极管的 V-I 特性,将高压脉冲信号钳位于二极管的导通电压,又使幅值较小的回波信号能够不失真的进入放大电路。

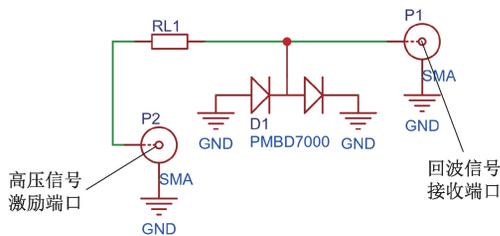


图 5 高压隔离电路
Fig. 5 High voltage isolation circuit

5) 上位机面板

上位机采用 QT C++ 语言编写,通过 USB 与硬件电路模块进行数据通信,设置激励参数、采集超声波形、波形滤波、TOF 计算、螺栓应力标定,具体模块分布如图 6 所示。

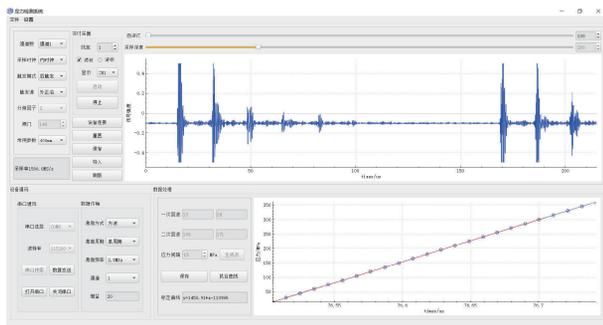


图 6 上位机面板
Fig. 6 Upper computer panel

2.2 螺栓应力-TOF 标定实验

在实验室环境下进行应力-TOF 函数关系标定实验。实验采用传感器为 2.5 MHz 压电传感器 (纵波) 贴附于

待测螺栓试样中心,耦合剂种类为红糖,试样基本参数如表 1 所示,现场试验如图 7 所示。

表 1 待测螺栓基本参数

Table 1 Basic parameters of bolts to be measured

螺栓直径/mm	螺栓等级	螺栓长度/mm	拉伸应力/MPa	拉伸轴力/kN
M42	10.9	555	450	750
M45	10.9	615	450	800
M64	10.9	450	450	1 200



①待测螺栓②压电传感器③SWC-2耦合剂④上位机
⑤SANS拉伸机⑥螺栓轴力检测系统

图 7 螺栓标定实验图

Fig. 7 Experimental diagram of bolt calibration

将压电传感器固定于待测风电螺栓上,在拉伸机上进行拉力实验,将材料弹性范围分为若干点,采用阶梯加载的方式,在每次保载时测量固定传播距离时超声波传播时间变化量,通过拟合建立应力-TOF 函数,得到拟合残差为应力标定误差。具体步骤如下:

步骤 1) 将待测风电螺栓拉伸试件固定于电液伺服万能试验机(SANS)上;

步骤 2) 将传感器按声波传播方向与试件拉伸方向平行固定在拉伸试件上,对试件进行阶梯应力加载拉伸,根据材料屈服强度设置加载范围、测量间隔、保载时间,且在保载时进行测量;

步骤 3) 系统产生双极性脉冲信号进行激励,对采集到的超声信号进行数据分析,获取 TOF 信号,构建应力-TOF 标定函数。

2.3 超声法与扭矩法误差对比实验

为了更好地验证超声法测量的准确性,本研究开展了超声法与扭矩法的误差对比实验。实验设备包括螺纹摩擦系数试验机、螺栓状态检测系统、2.5 MHz 压电传感器和上位机软件,现场试验如图 8 所示。

1) 将待测螺栓固定于螺纹摩擦系数试验机上,传感

器通过耦合剂固定于螺栓顶端;

2) 设定最大拉伸轴力,拉伸结束后,系统计算生成螺栓扭矩系数;

3) 设定拉伸步进间隔,保载时间设置为 30 s,开始对螺栓进行扭转;

4) 保载期间通过上位机软件获取螺栓 TOF 曲线,计算对应的 TOF。



①螺纹摩擦系数试验机②螺栓轴力检测系统③待测螺栓
④压电传感器⑤扭矩加载位置⑥上位机

图 8 扭矩加载实验图

Fig. 8 Experimental diagram of torque loading

3 实验结果分析

在超声检测中,常见的 TOF 计算方法包括零交点法、包络峰值法和互相关法等。相比其他方法,互相关法具有更高的抗噪性和精度,特别适用于超声回波信号的 TOF 计算。在信号频率相同但时序存在差异的情况下,互相关法通过计算信号间的相关性来精确估计它们之间的时间延迟,从而得到 TOF。该方法能够有效处理信号波形的噪声和复杂环境下的微小时延变化,特别适合在螺栓检测和应力测量等领域中应用。

互相关算法基于两个信号之间的相关性来估算时延。设有两组信号 $x(t)$ 和 $y(t)$, 它们的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (7)$$

互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 描述了两个信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在不同时间偏 τ 下的相似程度。当 $R_{xy}(\tau)$ 取得最大值时, τ 对应的时间偏移即为两个信号的时延。如果两个信号是周期信号,且周期相同,它们的互相关函数也是周期性的,周期保持不变;而频率不同的周期信号之间互不相关。

由于超声信号采集后是离散信号,其离散化后的互相关函数可表示为:

$$R_{xy}(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)y(m+n) \quad (8)$$

其中, N 为信号的长度, $n=0, 1, \dots, N-1$ 表示时间

偏移。

在螺栓检测中,由于一次回波和二次回波的频率相同且波形相似,但它们在时间上的位置不同,因此可以通过互相关函数计算它们的时间偏移。具体来说,上位机通过互相关算法计算这两组回波信号的互相关函数,从中找到最大峰值所对应的时间偏移,这个时间偏移即为所求的 TOF。该方法能够准确反映信号之间的时间延迟,为螺栓受力分析提供了精确的声时测量基础。同时,上位机利用该算法对实验数据进行分析,从而提高了检测精度和可靠性。

3.1 螺栓状态检测系统分析

1) 螺栓轴向应力模型

为了建立螺栓轴力应力模型并验证应力-TOF 信号测量的准确性,本研究开展了螺栓应力标定试验。根据实验结果,得到的标定曲线如图 9 所示。根据 GB/T 16823.1-1997 标准与应力-轴力公式为:

$$F = \sigma A \tag{9}$$

将应力-TOF 关系函数转化为轴力-TOF 关系函数,转换关系如图 9 右侧所示。通过这种转换,可以直观地将 TOF 与螺栓轴力关联,为螺栓预紧力的精确测量提供了理论支持。

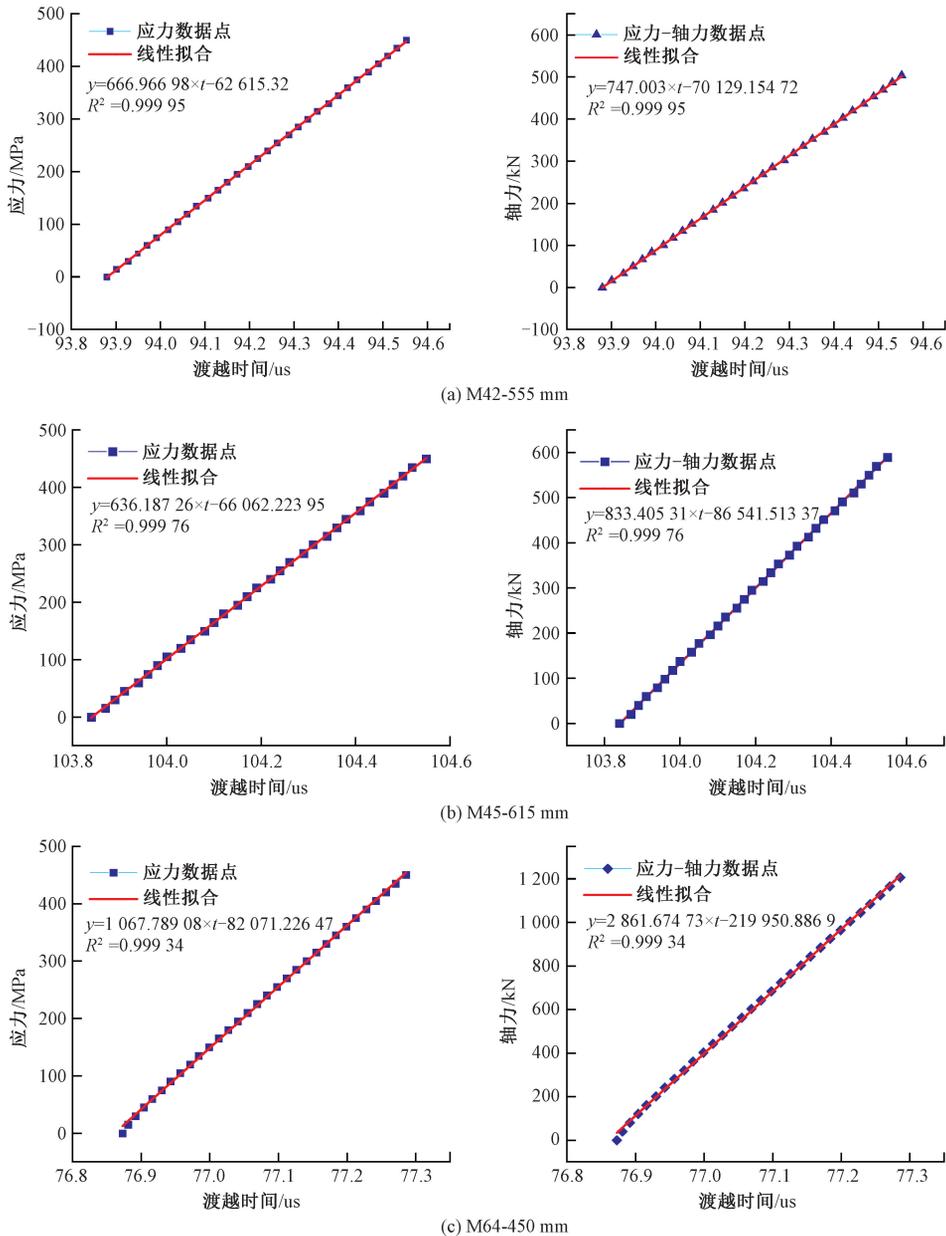


图 9 螺栓应力表征函数

Fig.9 Bolt stress characterization function

在本次实验中,对模型的拟合优度进行了评估,得到的 3 个残差系数分别为 0.999 34、0.999 95 和 0.999 76。这些残差系数均接近于 1,表明模型具有极高的拟合精度。特别是,残差系数达到了 0.999 9 以上,意味着模型对数据误差极小,能够准确反映数据的趋势和特征。

2) 理论与实际误差测试

为了探究螺栓应力-TOF 信号的测量准确性,本研究开展了 M42、M45、M64 3 种螺栓轴力拉伸实验。通过对螺栓进行轴力阶梯拉伸实验,获得了轴力-TOF 数据点,并将这些数据代入标定的应力-TOF 拟合函数,计算轴力值。随后,将计算的轴力值与拉伸机显示的轴力值进行比对,计算误差率。测试结果如图 10 所示。通过该方法,本研究能够验证理论模型与实际测量之间的误差,从而评估测量系统的精度。

根据图 10 的结果,系统在 40%螺栓轴力服役状态情况下,误差率能够控制在 $\pm 2.81\%$ 以内,本系统的测量误差较小。40%轴力服役状态是螺栓在实际应用中的工作负荷超过其保证载荷(GB/T 3098.23)的 40%。在这种状态下,螺栓承受较高的应力,更能反映其在实际负荷下的性能和可靠性。

3) 设备测量精度

为了进一步探究系统的最小分辨能力,本研究开展了 M42、M45、M64 3 种螺栓的实验,提取各自的轴力-TOF 变化量关系函数。

系统采用 3 GS/s 采样率,每个采样点的时间分辨率为 0.333 ns。将最小分辨 TOF 代入关系函数计算,得到系统最小分辨轴力值,可以评估系统在微小时间变化下的轴力测量精度,结果如图 11 所示。

通过实验数据分析发现,不同规格螺栓的轴力-TOF 变化量关系存在显著差异。M42、M45 和 M64 螺栓在相同的应力条件下,TOF 变化量的响应不同。其中,M42 螺栓的最小识别量可达 0.250 7 kN,M45 为 0.276 9 kN,M64 为 0.944 4 kN,识别精度非常高,满足螺栓检测需求。

4) 设备重复性

为了验证系统的重复性,本研究进行了多次重复实验,使用相同的设备和实验条件,对 M64 螺栓零应力状态进行轴力测量,评估系统在相同条件下的测量一致性和稳定性,实验结果如图 12 所示。

在此次实验中,标准差(SD)表示每次实验结果相对于平均值的离散程度。具体来说,标准差 $SD = 2.5 \times 10^{-4}$ 表明实验所得结果的波动范围非常小,数据点较为集中,偏差较小,显示了系统在高精度轴力测量中的可靠性能。

3.2 超声法与扭矩法误差对比分析

为了探究不同测量方法在螺栓应力检测中的误差表现,本研究开展了扭矩法和超声法的实验研究。首先,通

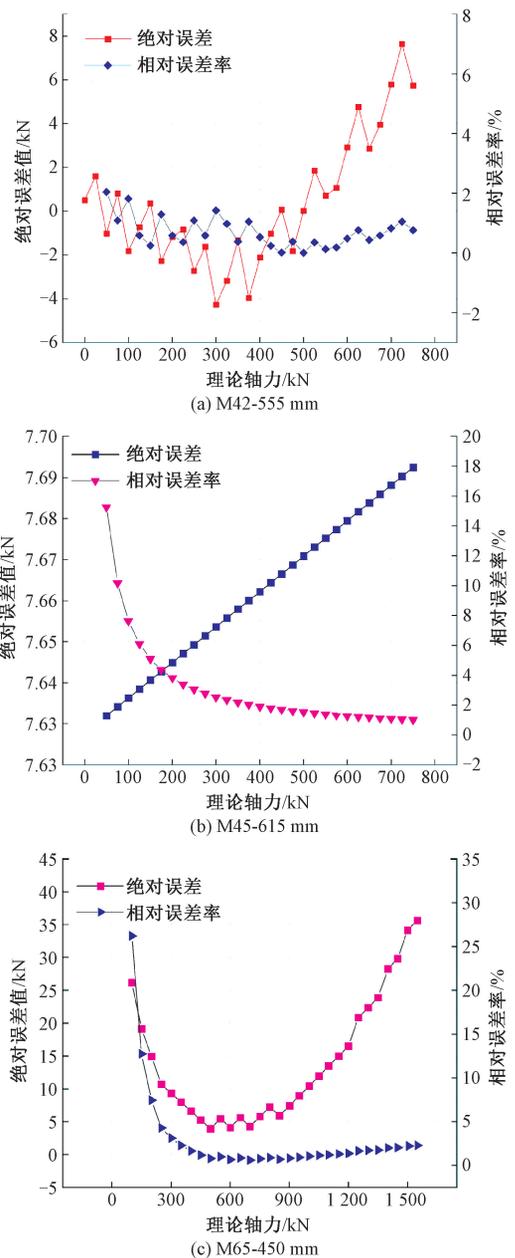


图 10 理论与实际误差对比

Fig. 10 Comparison of theoretical and actual errors

过扭矩法测量螺栓的应力,分别记录在螺纹摩擦系数试验机加载到指定轴力的瞬间产生的瞬时扭矩(极值状态)和加载到指定轴力后扭矩稳定的状态(稳定状态)。超声法则根据拉伸机标定的应力-TOF 函数,通过传感器测试螺栓在指定轴力状态下的 TOF,以获得相应的轴力数据。

根据开展的实验,分别获得了扭矩法和超声法的测量误差曲线,如图 13 所示。图中展示了两种方法在不同状态下的误差表现,评估其在实际应用中的可靠性和准确性。

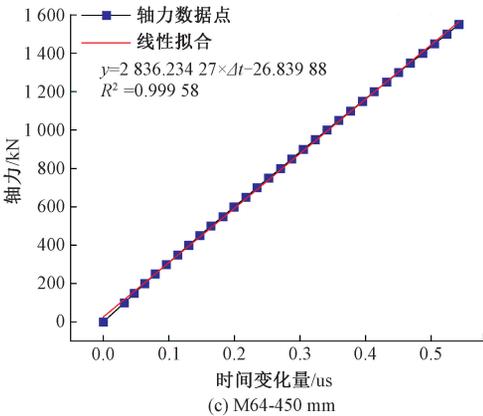
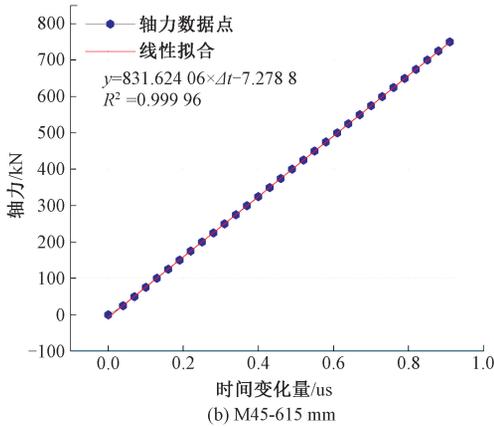
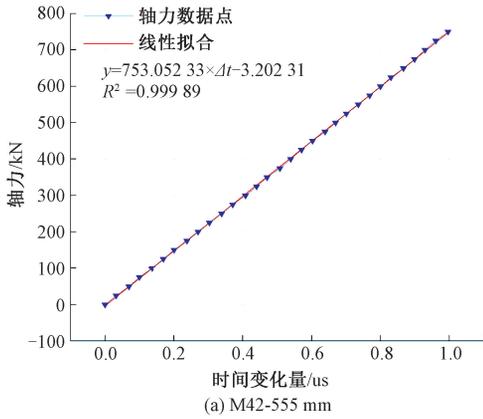


图 11 系统测量精度

Fig. 11 Minimum system resolution

根据实验结果,对 M42、M45 和 M64 螺栓的扭矩法与超声法测量误差进行了对比分析。对于 M42 螺栓,在轴力大于 400 kN 的情况下,超声法的误差控制在 20 kN 以下,而扭矩法的误差范围为 20~40 kN。对于 M45 螺栓,在 200 kN 轴力下,超声法的误差也控制在 20 kN 以下,而扭矩法的误差则在 20~40 kN 之间。针对 M64 螺栓,超声法的平均误差为 40 kN 左右,而扭矩法的平均误差为 60 kN 左右。

根据结果分析可知,超声法在所有测试条件下的误

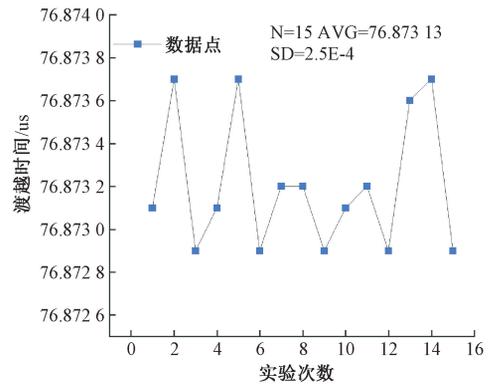


图 12 设备重复性实验

Fig. 12 Repeatability test of equipment

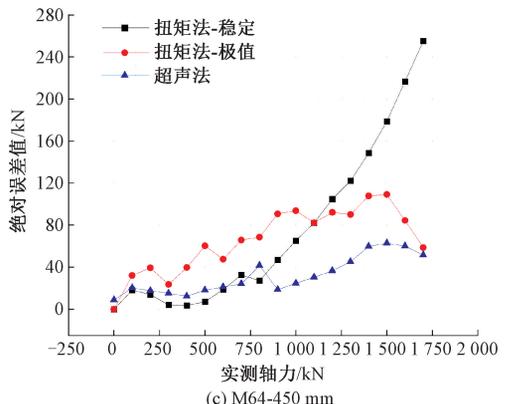
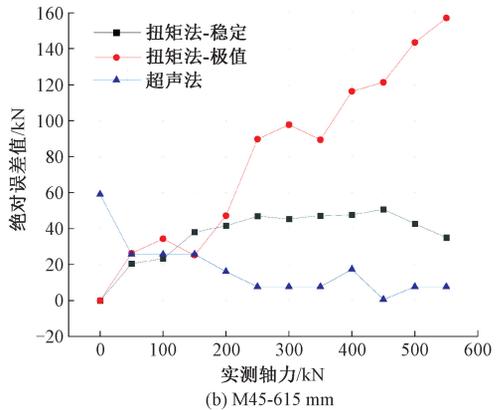
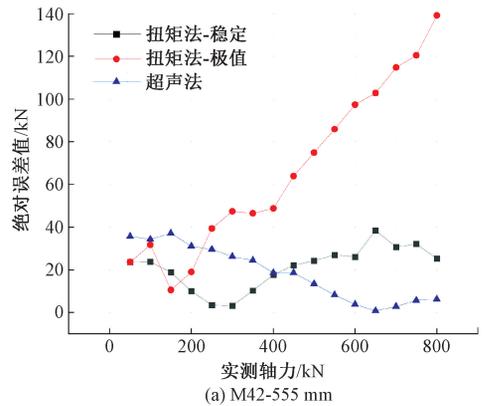


图 13 超声与扭矩法误差

Fig. 13 Ultrasonic method and torque method error

差控制优于扭矩法,尤其是在高轴力和不同轴力范围内表现出更高的测量精度。这表明,超声法在螺栓应力测量中具有更优的准确性和可靠性,特别是在高轴力状态下,能够提供更稳定的测量结果。

4 结 论

基于声弹性效应,研制了一套适用于螺栓预紧力测量的超声检测系统,旨在解决传统扭矩法在螺栓轴力测量中的误差问题。研究核心在于通过超声波技术获取螺栓应力状态,并利用 TOF 与螺栓应力的关系构建高精度的应力表征模型,通过实验验证了该模型的高精度与稳定性。在螺栓轴力为 40% 的服役状态下,系统测量误差率控制在 $\pm 2.81\%$ 以内,分辨率达到 0.250 7 kN,具有较高的测量精度。系统采用了压电传感器结合互相关算法,提高了信号处理的精度,克服了复杂环境下的噪声干扰。这一方法的关键技术在于声弹性效应与超声波传感技术的有效融合,使得在螺栓安装状态下,能够精确测量螺栓的预紧力。为了验证该系统的有效性,将超声法与传统扭矩法进行了对比分析。实验结果显示,针对 M42、M45、M64 螺栓,超声法的平均误差显著小于扭矩法,进一步证明了其在螺栓安装状态下的优越性与可靠性。未来的工作将重点扩展该超声法在更复杂工程结构中的应用,如桥梁、航空航天等高应力环境下的螺栓及关键部件的应力检测,从而实现更广泛的工程应用。这将为提高结构安全性和可靠性提供创新的技术支持,并推动超声检测技术在工程领域的普及与应用。

参考文献

- [1] PAN Q X, PAN R P, SHAO CH, et al. Research review of principles and methods for ultrasonic measurement of axial stress in bolts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 1-16.
- [2] MIYAZAKI T, SASAKI T. X-Ray residual stress measurement of austenitic stainless steel based on fourier analysis[J]. Nuclear Technology, 2016, 194(1): 111-116.
- [3] PERSSON E, ROLOFF A. Ultrasonic tightening control of a screw joint: A comparison of the clamp force accuracy from different tightening methods [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(15): 2595-2602.
- [4] 许锦泉,覃建昌. 螺栓装配扭矩-转角法工艺开发[J]. 装备制造技术, 2022(6): 281-284.
XU J Q, QIN J CH. Process development of torque-turn method for bolt assembly[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(6): 281-284.
- [5] 郭伟建,奚尊挺. 高强度螺栓连接副终拧扭矩检测技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(5): 44-46.
GUO W J, XI Z T. Research on the final torque detection technology of high-strength bolted joints[J]. China Water Transportation (Second Half), 2022, 22(5): 44-46.
- [6] 杨光,张辽远,张百慧,等. 高强度螺栓扭矩系数影响因素的实验研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(6): 59-63.
YANG G, ZHANG L Y, ZHANG B H, et al. Experimental study on the influencing factors of torque coefficient of high strength bolts[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 38(6): 59-63.
- [7] 徐春广,栗双怡,黄院生,等. 基于扭矩法和超声法检测螺栓预紧力的误差分析[J]. 电子机械工程, 2023, 39(2): 1-4.
XU CH G, CURI SH Y, HUANG Y SH, et al. Error analysis of bolt preload detection based on torque method and ultrasonic method [J]. Electrical and Mechanical Engineering, 2023, 39(2): 1-4.
- [8] 庞松. 基于超声波的风电机组多螺栓应力在线监测研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
PANG S. Ultrasonic-based online monitoring of multi-bolt stress in wind turbines [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [9] 徐春广,李骁,潘勤学,等. 螺栓拉应力超声无损检测方法[J]. 应用声学, 2014, 33(2): 102-106.
XU CH G, LI X, PAN Q X, et al. Ultrasonic nondestructive testing method for bolt tensile stress[J]. Applied Acoustics, 2014, 33(2): 102-106.
- [10] HOSOYA N, HOSOKAWA T, KAJIWARA I, et al. Evaluation of the clamping force of bolted joints using local mode characteristics of a bolt head[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(4): 75.
- [11] PAN Q X, PAN R P, SHAO CH, et al. Research review of principles and methods for ultrasonic measurement of axial stress in bolts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 11.
- [12] 严勇,刘楚达. 风电螺栓轴向应力超声测量标定实验研究[J]. 应用声学, 2021, 40(4): 594-601.
YAN Y, LIU CH D. Experimental study on calibration of ultrasonic measurement of axial stress in wind turbine bolts[J]. Applied Acoustics, 2021, 40(4): 594-601.
- [13] 唐心亮,刘子剑,于平平. 面向多尺度多方向螺栓的检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 221-231.
TANG X L, LIU Z J, YU P P. Detection algorithm for

- multi-scale and multi-directional bolts [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 221-231.
- [14] 吴向阳, 张志毅, 李亚南, 等. 横纵波法测量螺栓轴向应力的温度修正[J]. *无损检测*, 2023, 45(5): 37-40.
- WU X Y, ZHANG ZH Y, LI Y N, et al. Temperature correction of axial stress in bolts measured by transverse longitudinal wave method [J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(5): 37-40.
- [15] ZHANG Y X, JIANG Y H, MA CH, et al. Preparation of ZnO piezoelectric thin-film material for ultrasonic transducers applied in bolt stress measurement [J]. *Coatings*, 2023, 13(9): 1538.
- [16] 何星亮. 基于高频柱面超声导波的螺栓轴向应力测量技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- HE X L. Research on the measurement of bolt axial stress based on high-frequency ultrasonic guided wave in column surface [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [17] 何星亮, 陈平. 基于高频柱面超声导波的螺栓轴向应力测量[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 179-186.
- HE X L, CHEN P. Measurement of bolt axial stress based on high-frequency column surface ultrasonic guided wave [J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 42(4): 179-186.
- [18] HE X L, CHEN P. Ultrasonic measurement of bolt axial stress using the energy ratio of multiple echoes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 3928-3936.
- [19] 吕炎, 谢龙扬, 宋国荣, 等. 基于声弹性效应的螺栓轴向应力检测方法[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(9): 920-927.
- LYU Y, XIE L Y, SONG G R, et al. Detection of axial stress in bolts based on acousto-elastic effect [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2022, 48(9): 920-927.
- [20] 吕炎, 张现奇, 高杰, 等. 基于声弹性效应的螺栓轴向应力检测方法 & 系统 [J]. *无损检测*, 2023, 45(7):

11-15.

LYU Y, ZHANG X Q, GAO J, et al. Method and system for axial stress detection of bolts based on acoustoelastic effect [J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(7): 11-15.

作者简介



徐晓, 1994 年于大连理工大学获得学士学位, 现为中国船级社实业有限公司高级工程师, 主要研究方向为智能检验检测技术, 检验检测技术规范及试验验证技术。

E-mail: xxu@ccsi.com.cn

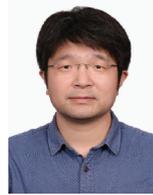
Xu Xiao received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 1994. He is now a Senior Engineer at China Classification Society Industrial Co., Ltd. His main research interests include intelligent inspection and testing technology, inspection and testing specifications, and test and verification technology.



姜涛, 2016 年于聊城大学获学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: jiangtao@emails.bjut.edu.cn

Jiang Tao received his B. S. degree from Liaocheng University in 2016. He is now a M. Sc. candidate at Beijing University of Technology. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing.



吕炎 (通信作者), 2008 年于北京航空航天大学获工学学士学位, 2014 年于北京工业大学获工学博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: lvyuan@bjut.edu.cn

Lyu Yan (Corresponding author) received his B. Sc. degree in engineering from Beijing University of Aeronautics and Astronautics (BUAA) in 2008 and the Ph. D. degree in engineering from Beijing University of Technology in 2014. His main research interest includes ultrasonic non-destructive testing.